第 39 卷　第 3 期
2021 年 9 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39,　No. 3
Sept., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.03.08

全金属缝隙天线在 PAF 馈源中的应用

马　月[1,2,3]，庞　峰[3]，王　君[1,2,3]，于京龙[1,3]，彭　勃[1,3]

(1. 中国科学院FAST重点实验室，北京　100101；　2. 中国科学院大学北京　100049；　3. 中国科学院国家天文台，北京　100101)

摘要： 对直线缝隙天线进行了理论分析、仿真和优化设计，并制作出实验样机单元。从天线馈电部分分析入手，采用同轴探针馈电方式，内导体利用多个匹配环来改善工作带宽。与传统直线缝隙天线相比，天线主体增加了腔体缝隙结构，实现了天线样机 4∼12 GHz 频段三个倍频程的带宽，E 和 H 面方向图仿真与测试基本一致。全频段最大增益值在 4∼8 dBi 之间，达到了宽带阵列天线的设计要求，为平方公里阵列射电望远镜馈源的应用提供了可能的选择。

关　键　词： 直线缝隙天线；馈电；宽带；阵列

中图分类号： TN216　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

在星系演化和复杂相互作用研究中，射电天文学观测对望远镜视场和巡天速度提出了更高要求。相位阵馈源 (phased array feed, PAF) 是一种全新的射电天文技术，可以为射电望远镜提供较大的视场，并显著提高巡天速度。相位阵馈源就像无线电摄像机一样，通过对其单元响应加权组合，在天空中形成多个瞬时波束。在这些波束的形成过程中形成了许多自由度，例如，控制光束模式及其旁瓣、优化孔径效率和执行射频干扰 RFI (radio frequency interference) 消减[1]。相对于传统喇叭馈源系统，PAF 系统的复杂性带来了许多技术挑战，包括阵列天线工作带宽、扫描范围、阵元间耦合；此外，在低噪声放大器设计、信号传输、数字信号处理和系统校准等领域也有诸多困难。

因为具备先进的科学探测能力和极高技术可行性，PAF 是 SKA 先进仪器计划中重点研发的技术。澳大利亚平方公里阵列 (square kilometre array, SKA) 探路者——ASKAP (Australian SKA Pathfinder)，成功开发出具有宽视场的创新“相位阵馈电”接收器，并首

收稿日期： 2021-01-04；　**修回日期：** 2021-03-05

资助项目： 国家重点研发计划 (2018YFA0404703)，国家自然科学基金 (U1931125)，中国科学院FAST重点实验室开放课题

通讯作者： 马月，yuema@nao.cas.cn

次将这种技术应用于射电天文观测。

本文将介绍一些目前正在为现有望远镜和未来望远镜开发的 PAF 系统，通过分析现有 PAF 技术，提出了一种全新的阵列单元设计方案。

荷兰 APERTIF (APERture Tile In Focus)[2] 工作在 1~1.75 GHz，馈源由 121 个 Vivaldi 单元组成，激励馈电 56 个单元。2011 年，澳大利亚 SKA 先导单元是第一个配备相位阵馈源的射电望远镜，安装了双极化焦平面阵列馈源，馈源阵列采用 188 个棋盘式贴片单元印刷在低损耗的介质材料上，工作频段为 700~1 800 MHz[3]。自 2015 年，Dunning 等人[4] 开展了全金属 Rocket 5×4 阵列 PAF 馈源研究，工作在 0.55~1.8 GHz，阵列间距 90 mm，采用差分馈电，输入阻抗 180 Ω。加拿大 National Research Council (NRC) 的 Lisa 正在开展制冷相位阵馈源的研究[5]，设计了 140 个全金属 Vivaldi 单元，馈电激励 96 个单元，44 个无源单元，工作在 S/C 波段的 2.8~5.18 GHz。美国国家射电天文台 (national radio astronomy observatory, NRAO) 与美国杨百翰大学 (Brigham Young University, BYU) 合作，2010 年 Karl 等人为美国西弗尼亚州绿岸 (Green Bank) 20 m 望远镜天线上安装了单极化 19 单元粗偶极子相位阵馈源，工作在 1.36~1.84 GHz，输入阻抗 50 Ω[6]。2017 年 BYU 与 NRAO 为美国绿岸射电天文望远镜 (Green Bank Telescope, GBT) ——100 m 研制了新型双极化 19 单元 PAF 馈源 Focal L-band Array for the GBT (FLAG) Phase II，中心频率是 1 350 MHz，振子间距 0.68 λ，工作带宽 150 MHz[7]。英国正在为 SKA 中频孔径阵列天线开展 PAF 研究，主要工作频段在 400~1 450 MHz，采用电容紧耦合八角环形振子天线形式，双极化方式，利用三层介质超材料改善带宽，由 117 个单元组成[8]。

目前国内外大多数进行的是低频段窄带相位阵馈源的研究。PAF 在 SKA 建设准备阶段的研究中属 AIP (先进仪器项目)，目的是通过相位阵馈源天线阵有效扩大射电望远镜视场，提高巡天观测效率。开展宽带相位阵馈源的可行性研究，将扩大单个接收机频率覆盖，同时减少接收机数目，提高观测灵敏度，在建设和运行维护阶段有重要意义。本论文主要对宽频带、结构简单的槽线天线 TSA (tapered slot antenna) 阵列单元研究。

2　全金属 LTSA 直线渐变缝隙天线相位阵阵列单元的设计与分析

在相位阵馈源的研究中，阵列单元的形式选择尤为重要，本文采用的是直线渐变缝隙天线 LTSA (linearly tapered slot antenna)。目前，TSA 天线在单极化和双极化的超宽带天线中比较流行，广泛应用于通信侦查、电子战和雷达上。TSA 天线结构具有极好的电气性能，易加工、成本低、功率高和耐久性强。

TSA 天线最早由 Lewis 等人于 1974 年提出，1979 年 Gibson 也对其进行了研究，并命名为“Vivaldi”。传统 TSA 天线由渐变张开的槽线印制于微波基片上构成，通常由微带线或带状线馈电。根据渐变形式不同，渐变缝隙天线主要有三种：指数渐变 (Vivaldi)、直线渐变 (LTSA)、等宽渐变 (CWSA)。三种形式各有优点：指数渐变的带宽最宽，但增益较低；等宽渐变的增益最大，但带宽较窄；直线渐变的带宽和增益都介于两者之间，并且有稳

定的输入阻抗[9]。直线渐变缝隙天线 (LTSA) 属于端射行波天线，一般可以印刷在介质板上或者全金属铸造一条逐渐张开的槽线而将电磁能量辐射出去。这种天线具有宽频带，方向图对称性好，在组成阵列时，阵元间互耦效应可改善其匹配。其中全金属 LTSA 天线形式，采用 SMA (Sub-Miniature-A) 连接器直插馈电，相较于传统印刷型 Vivaldi 阵列天线，具有结构简单，强度高，耐大功率，易于模块化拓展的优点。因此，直线渐变缝隙天线在相位阵方面得到广泛应用。本文研究的是全金属直线缝隙渐变天线。

由于 TSA 天线宽频带特性和结构简单，在介质天线上已开展了很多应用，例如，在 UWB 频段 LTSA 天线[10,11]，在 UWB 频段上的改进型椭圆对称对踵 Vivaldi 设计[12]。传统 TSA 天线是利用电路技术印刷在介质板上，介质天线具有重量轻、成本低、加工简单的特点。但它也具有一些缺点，例如带来大的微带损耗、复杂的安装和集成、低的结构强度。全金属结构天线可以克服这些缺点，如 Lekshmi 和 Raglend[13]在 9~9.8 GHz 的全金属 Vivaldi 单极化阵列天线的设计，Kindt 和 Pickles[14]在 725 MHz~8.7 GHz 改进型的双极化全金属 64 阵列 Vivaldi 天线研究等。LTSA 天线作为相位阵馈源的主要应用形式，本文主要介绍在 4~12 GHz 频段内 Vivaldi 阵列单元 CST (computer simulation technology) 电磁仿真模型、设计过程及样机加工测试。该样机通过矢量网络分析仪完成了驻波测试，在微波暗室完成了方向图及增益测试。

2.1 LTSA 天线单元的设计方法及仿真模型分析

2.1.1 LTSA 天线设计原则

Yngvesson 等人[15,16]对于 LTSA 馈源阵做了大量研究，建立了一些经验公式，指出要获得高的辐射效率，要求天线结构满足以下条件 (如图 1 所示)：

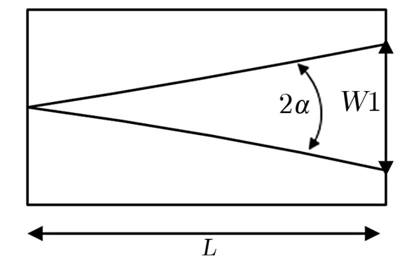


图 1　传统 LTSA 天线参数示意图

(1) 使天线有效辐射、渐变槽口径宽度 $W_1 > \lambda_c/2$ (λ_c 为中心频率 8 GHz 在空气中的工作波长)；

(2) 渐变张开角度 2α 的取值范围：$5^\circ \sim 20^\circ$；

(3) 天线渐变段长度取值 $2\lambda_c \sim 10\lambda_c$，$L$ 小于 $2\lambda_c$ 时，天线不能形成行波电流，大于 $10\lambda_c$ 时长度增加对增益提高很小。

在开展 LTSA 天线设计时，我们遵循了此原则。

2.1.2 LTSA 天线模型设计

我们对以下参数优化了 LTSA 天线主体结构，天线仿真模型及参数如图 2 所示。最终优化的 LTSA 天线模型参数值见表 1。

针对馈电点的设置及同轴探针内导体的设计如图 3 所示，主要在内导体内增加 2 个匹配环，改善全频段内的驻波特性，获得稳定的输入阻抗。

2.1.3 LTSA 天线仿真模型分析

经 CST 软件优化仿真，由图 4 所示，渐变段长度 $L1$ 优化到 79 mm，驻波可满足全频段 2 以下。仿真步长设置为 5 mm，渐变段长度 $L1$ (84 mm) 越长时，在 5 GHz 驻波越高；渐变段长度 $L1$ (74 mm) 越短时，在 4 GHz 驻波越高。Slot 缝隙长度 $L3$ 优化到 6 mm，驻波

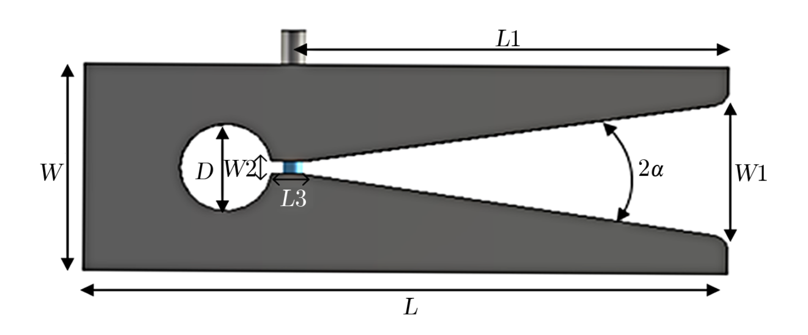


图 2　LTSA 天线仿真模型及参数

表 1　最终优化的 LTSA 天线模型参数值

参数	尺寸	参数描述
L	119.9 mm ($3.2\lambda_c$)	天线长度
$L1$	81.8 mm	天线渐变段长度
W	43.98 mm	天线宽度
$W1$	29.76 mm$>\lambda_c/2$	渐变槽口径宽度
2α	$17°$(在 $5°\sim20°$ 之间)	渐变张开角度
D	17 mm	腔体直径
$W2$	2.5 mm	Slot 缝隙宽度
$L3$	6 mm	Slot 缝隙长度
$Douter$	3.5 mm	外导体直径
$Louter$	31 mm	外导体总长
$Lring1$	4.8 mm	第一个匹配环长度
$Dring1$	1.5 mm	第一个匹配环直径
$Lring2$	1 mm	第二个匹配环长度
$Dring2$	1.5 mm	第二个匹配环直径
$Linner1$	19.36 mm	外侧内导体长度
$Dinner1$	1.5 mm	外侧内导体直径
$Linner2$	8.8 mm	内侧内导体长度
$Dinner2$	0.63 mm	内侧内导体直径

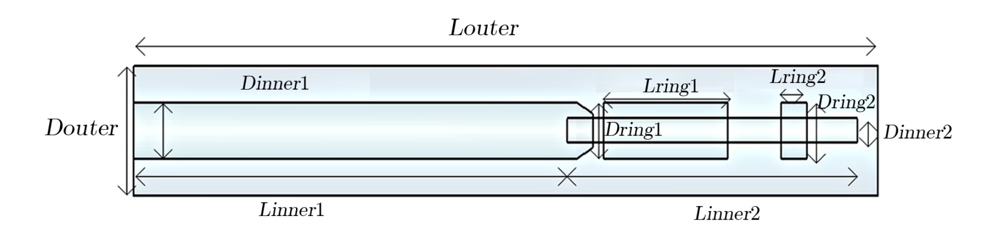


图 3　LTSA 天线同轴馈电设计模型

可满足全频段 2 以下。仿真步长设置为 3mm，Slot 缝隙长度 $L3$ (9 mm) 越长时，在 5 GHz 以后的频段驻波全部升高；Slot 缝隙长度 $L3$ (3 mm) 越短时，在 4.5 GHz 驻波越高。Slot 缝隙宽度 $W2$ 优化到 2.5 mm，驻波可满足全频段 2 以下。仿真步长设置为 0.5 mm，Slot 缝隙宽度 $W2$ (3 mm) 越宽时，在 4.5 GHz 驻波越高；Slot 缝隙宽度 $W2$ (2 mm) 越窄时，在 5 GHz 以后的频段驻波全部升高。对比内导体匹配环对驻波的影响，内导体只加匹配环 1 可以降低 4.5 GHz, 78 GHz 驻波；内导体只加匹配环 2，可改善低频段 4.5~5.2 GHz 的驻波；内导体同时加匹配环 1 和 2，可有效降低全频段的驻波。

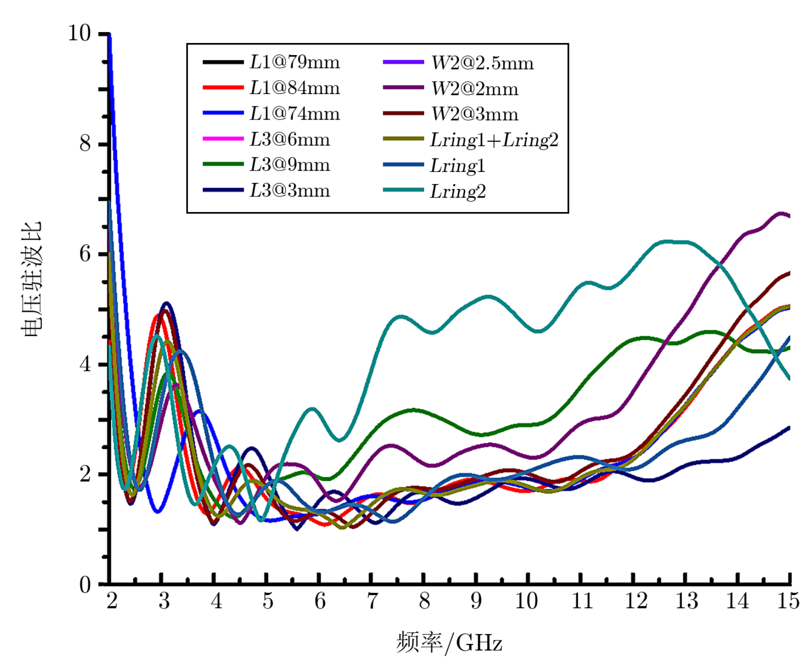


图 4 LTSA 渐变段长度 $L1$、Slot 缝隙长度 $L3$、Slot 缝隙宽度 $W2$ 和内导体匹配环对驻波的影响

综上所述，直线缝隙天线中引入腔体缝隙结构，实现了天线良好的匹配，获得了较好的驻波特性；同轴探针采用多个匹配块级联的方式，内导体增加匹配环消除了驻波不连续性，并实现了 50 Ω 阻抗匹配。

2.2 LTSA 天线单元样机及测试

为了验证理论分析和设计方法的正确性，加工了单端口全金属铝质 LTSA 天线单元样机 (如图 5 所示)，并分别测试了驻波和远场辐射方向图。

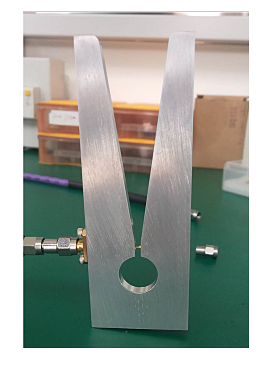


图 5 LTSA 天线单元样机

2.2.1 LTSA 驻波测试

LTSA 馈源单元样机经矢量网络分析仪，进行了驻波测试，测试的结果与 CST 的仿真数据进行了对比。由图 6 所示，VSWR 测试与仿真的数据比较匹配，除测试点在 5 GHz 时高于 2，其余频段均小于 2，实现了 412 GHz 内 3 倍频程工作带宽。

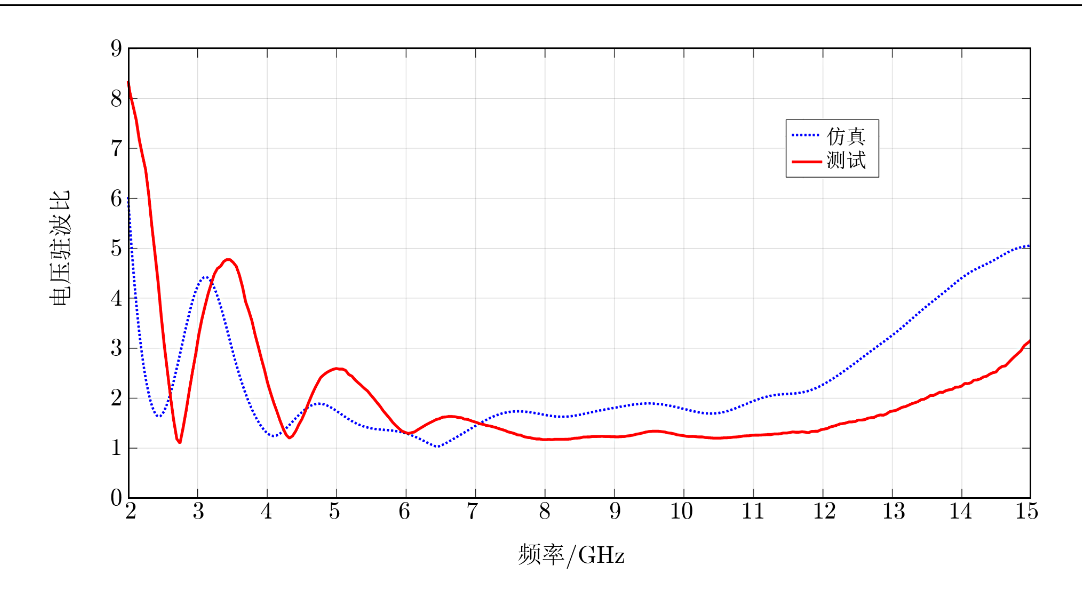


图 6　LTSA 天线 VSWR 仿真与测试对比

2.2.2　LTSA 方向图及增益测试

LTSA 馈源单元样机在微波暗室进行了远场方向图测试，由图 7 和 8 可以看出，E, H 面主极化远场方向图实测与仿真在大多数频率下的趋势基本吻合，10 dB 波束宽度在大多数频段内维持约 ±36°，增益最大值在全频段内 4~8 dBi 之间。

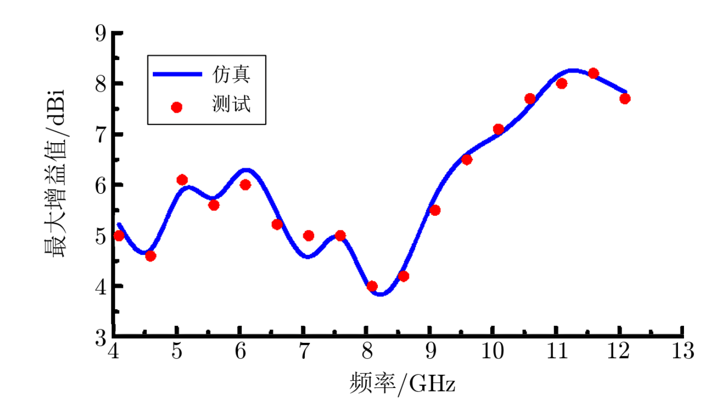
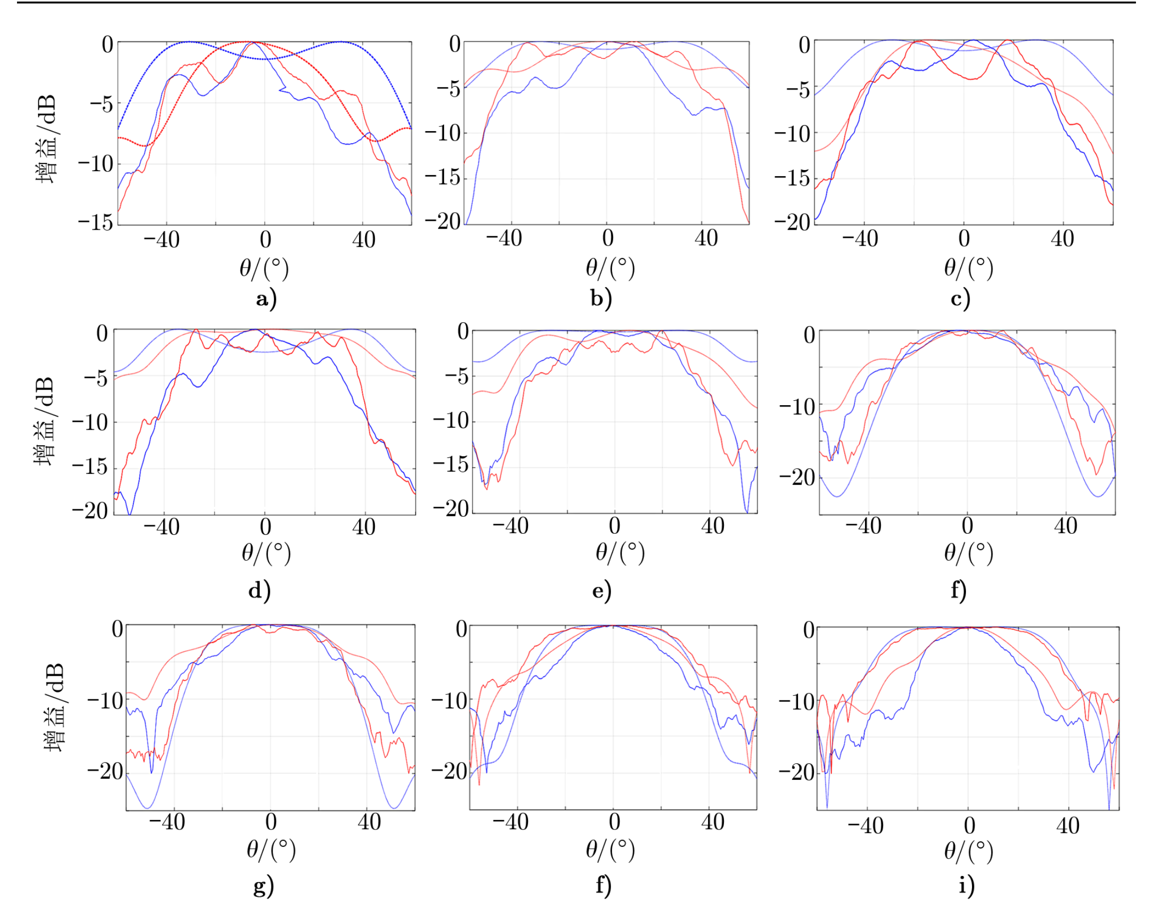


图 7　LTSA 天线最大增益仿真与测试对比

3　LTSA 馈源单元天线结论

本文对全金属 LTSA 直线渐变缝隙天线相位阵阵列单元开展了设计与分析，制作了实验样机。E, H 面主极化方向图仿真与测试结果比较一致，10 dB 波束宽度在大多数频段内约



注：a) 4.1 GHz, b) 5.1 GHz, c) 6.1 GHz, d) 7.1 GHz, e) 8.1 GHz, f) 9.1 GHz, g) 10.1 GHz, h) 11.1 GHz, i) 12.1 GHz。蓝色点线表示仿真的 E 面主极化方向图，蓝色实线表示测试的 E 面主极化方向图，红色点线表示仿真的 H 面主极化方向图，红色实线表示测试的 H 面主极化方向图。

图 8 E，H 面主极化方向图仿真实测对比

±36°，最大增益值在全频段 4∼8 dBi 之间，可以实现天线样机 4∼12 GHz 频段三个倍频程工作带宽。对比传统的 LTSA 天线，我们增加了腔体缝隙结构，实现了天线良好匹配，获得了较好驻波特性。同时，采用同轴探针馈电，内导体增加匹配环消除了驻波不连续性，并实现了 50 Ω 阻抗匹配，进而实现了宽带特性。从表 2 可以看出，近几年射电天文相位阵馈源阵列单元天线性能对比中，利用全金属进行 LTSA 天线的设计，并引入腔体缝隙结构和内导体匹配环的新型馈源单元设计，已实现了宽频带性能的设计要求，可以继续进行组阵研究。这无疑为 SKA 射电望远镜高性能馈源的应用提供了一种可能的选择。

表 2　近几年射电天文中的相位阵馈源阵列单元天线性能对比

序号	名称	工作频率和带宽	驻波 VSWR	单元尺寸 (宽×高)
1	Lisa 设计的 Vivaldi 单元[5]	2.8～5.18 GHz(1.85:1)	2	28.8 mm ×53.6 mm ($0.38\lambda_c$, $0.7\lambda_c$)
2	Hay 设计的介质振子单元[3]	700 MHz～1.8 GHz(2.57:1)	2	90 mm × 65 mm ($0.38\lambda_c$, $0.27\lambda_c$)
3	Karl 设计的粗偶极子单元[6]	1.36～1.84 GHz(1.35:1)	2	88 mm × 77 mm ($0.46\lambda_c$, $0.41\lambda_c$)
4	本论文设计的 LTSA 单元	4～12 GHz(3:1)	2	43.98 mm × 119.9 mm ($1.7\lambda_c$, $3.2\lambda_c$)

注：λ_c 为中心工作频率的波长。

致谢

感谢国家天文台所级公共技术中心的中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目实施方案《FAST超宽带相位阵馈源的研制》相关设备的支持。

参考文献：

[1] Cappellen W V, Vaate J G B D, Warnick K, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/6051207, 2011
[2] Appellen W A Van, Bakker L, Oosterloo A T. https://ieeexplore.ieee.org/document/5613297, 2010
[3] Hay S G, O'Sullivan J D, Mittra R. https://ieeexplore.ieee.org/document/5725167, 2011
[4] Dunning A, Bowen M A, Hayman D B, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/7824657, 2016
[5] Holland W S, Zmuidzinas J, Locke L, et al. https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9914/1/CryoPAF4-a-cryogenic-phased-array-feed-design/10.1117/12.2232190.full?SSO=1, 2016
[6] Warnick K F, Carter D, Webb T, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/5722997, 2011
[7] Roshi D A, Warnick K F, Brandt J, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/7305077, 2015
[8] Zhang Y, El-Makadema A, De L A E, et al. https://link.springer.com/article/10.1007/s10686-018-9608-z, 2018
[9] Nourinia J, Azizian S, Hekmat M. https://dl.acm.org/doi/10.5555/1981726.1981824, 2006
[10] Wu J, Zhao Z, Liu J, et al. https://www.jpier.org/PIERC/pier.php?paper=12031204, 2012
[11] Yao Y, Chen W, Huang B, et al. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100702140970001X, 2009
[12] Hammad H F. https://ieeexplore.ieee.org/document/8888395, 2019
[13] Lekshmi B S K, Raglend I J. https://indjst.org/articles/a-vivaldi-antenna-for-x-band-phased-array-radar, 2015
[14] Kindt R, Pickles R. https://ieeexplore.ieee.org/document/5171599, 2009
[15] Yngvesson K S, Schaubert D H, Kollberg E L, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/1143542, 1986
[16] Lee R Q. http://core.ac.uk/display/20801952, 2005

The Design and Analyze on Phased Array Feed Element for Radio Astronomy

MA Yue[1,2,3], PANG Feng[3], WANG Jun[1,2,3], YU Jing-long[1,3], PENG Bo[1,3]

(1. CAS Key Laboratory of FAST, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The linearly tapered slot antenna is theoretically analyzed, simulated and optimized in this paper. To verify the theoretical performance, a prototype of the proposed antenna was manufactured and tested. In the design process, to enhance the impedance bandwidth, the coaxial probe feeding method was adopted as a feed part of the antenna, multiple matching rings was used as inner conductor, as well as cavity gap structure was introduced to the antenna body. Compared with the traditional linear slot antenna, the proposed antenna structure was realized three octaves of frequency bands over 412 GHz. The simulation of E-plane and H-plane of the radiation patterns of the antenna is verified with the measurement, the maximum gain is ranging between 48 dBi over the full frequency band. The final antenna geometry is optimized and formed by using built-in software optimization tool which satisfies several design requirements. The performance of the antenna confirms that it is a potential candidate as a feed option for SKA dish prototype.

Key words: linearly tapered slot antenna; feed; wideband; array